

DOI:10.11918/202406062

夏季玻璃幕墙热反射对周边环境微气候的影响

杜欣怡, 欧阳金龙, 高庆龙, 王春苑

(四川大学 建筑与环境学院, 成都 610065)

摘要: 为了解和掌握夏季玻璃幕墙热反射对周边环境微气候的影响, 并提高对其因肉眼无法识别而鲜少受到关注的问题的重视, 采用光学模拟、模型实验和实地测试的方式, 确定反射区位置并量化幕墙热反射的影响。首先, 应用光学镜面反射原理, 揭示幕墙热反射的形成原理、变化规律和潜在危害; 其次, 以成都市春熙路广场及其周边幕墙建筑群为例, 采用光学模拟、模型实验方法确定广场上热反射区的逐时位置, 并通过实地热环境测试和对比, 量化分析幕墙热反射的影响; 最后, 提出一系列管控幕墙热反射及其危害的应对策略。实验结果表明: 与普通区相比, 热反射区的平均辐射温度高出 4~13 °C, 气温高出 1~2 °C, 湿度低了 5%~10%, 热气候指数高出 2~5 °C。研究结果证实了夏季幕墙热反射对周边环境微气候及行人热舒适度影响显著, 为此, 需在城市规划和幕墙设计中纳入热反射管控策略, 以降低其负面影响。

关键词: 镜面反射; 定向反射; 热反射区; 光学模拟; 模型实验; 热气候指数

中图分类号: TU111

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)09-0011-10

Impact of summer glass curtain walls thermal reflection on microclimate of surrounding environments

DU Xinyi, OUYANG Jinlong, GAO Qinglong, WANG Chunyuan

(College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To understand and investigate the impact of summer thermal reflection from glass curtain walls on the microclimate of surrounding environments, and to raise awareness of this rarely acknowledged issue, which is often overlooked due to its invisibility, this study employed optical simulation, scale modeling, and field measurements to identify reflection zones and quantify thermal reflection effects. Firstly, the principles, variation patterns, and potential hazards of thermal reflection from curtain walls are explored using optical mirror reflection principles. Secondly, taking Chunxi Road Plaza and its surrounding curtain wall buildings in Chengdu as an example, optical simulation and experimental modeling methods were used to determine the hourly positions of thermal reflection areas on the square. Through on-site thermal environment testing and comparative analysis, the impact of curtain wall thermal reflection was quantified. Finally, a series of strategies were proposed to control curtain wall thermal reflection and mitigate its hazards. The results indicate that compared to normal areas, the average radiant temperature in thermal reflection areas was higher by 4 to 13 °C, air temperature was elevated by 1 to 2 °C, humidity was reduced by 5% to 10%, and the universal thermal climate index was increased by 2 to 5 °C. These findings confirm the significant influence of summer curtain wall thermal reflection on microclimate environments and pedestrian thermal comfort. Therefore, incorporation of thermal reflection management strategies into urban planning and curtain wall design is imperative to reduce its negative impacts.

Keywords: specular reflection; directional reflection; thermal reflection zone; optical simulation; model experiment; universal thermal climate index

具有镜面反射特性的玻璃幕墙可定向反射太阳直射光线, 形成优美的城市景观, 广受建筑师、决策者等的喜爱。所以, 在中国城市化进程中, 玻璃幕墙被广泛应用于高层办公楼、商业大厦等现代化建筑, 其中不乏地标性的城市建筑, 尽管其造成的光污染

问题^[1]饱受争议。

由于太阳光热一体, 玻璃幕墙定向反射光的同时, 也定向反射太阳热辐射。特别是在夏季晴日昼间, 其定向反射的强烈太阳辐射将影响周边环境的微气候^[2]。比如, 美国达拉斯的纳西尔雕塑中心

收稿日期: 2024-06-26; 录用日期: 2024-08-01; 网络首发日期: 2025-03-11

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250311.0958.002>

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3802704)

作者简介: 杜欣怡(2001—), 女, 硕士研究生; 欧阳金龙(1976—), 男, 教授, 硕士生导师

通信作者: 高庆龙, gao3066@163.com

(Nasher Sculpture Center)附近一栋高层幕墙建筑将强烈的太阳辐射通过雕塑中心的玻璃屋顶反射进室内,致使艺术品受损、花园区域过热而无法使用^[3];香港的环球贸易广场(International Commerce Centre)也因其幕墙的热反射,导致周边居民楼室温升高、空调能耗增加,进而引发众多居民投诉^[4]。为了追求美观艺术效果,甚至出现了一些具有大面积内凹式的玻璃幕墙建筑,如美国洛杉矶的迪斯尼音乐厅(Walt Disney Concert Hall)^[2]、拉斯维加斯的维达拉酒店(Vdara Hotel)^[2]和英国伦敦的对讲机大楼(Walkie Talkie)^[5]等。国内外学者通常采用基于光学镜面反射原理的光线追踪方法^[4-6]或实地测量的方式^[7-8]分析此类幕墙的危害,即容易聚集大量太阳辐射于内凹区而出现局部高温高热,易造成人体皮肤灼伤、车辆热损坏,甚至火灾等^[9]。但内凹式幕墙建筑相对少见,而普遍存在的平板式幕墙建筑更具有代表性和研究价值。

由于幕墙热反射引起的室外局部区域(即热反射区)过热问题,人的肉眼无法看清,短时接触不能辨识,常被误认为是天气原因,所以鲜有文献关注平板幕墙热反射的影响及其危害^[4]。当前,国内外学者多关注于大面积玻璃幕墙造成的室外眩光^[10]、室内热环境^[11-13]、室内光污染^[14]和建筑空调能耗过高^[15]等问题,现有研究对城市幕墙热反射的危害及其微气候环境影响缺乏足够考量,尤其是对建筑反射光热对其邻近环境的量化分析较为不足^[2,16-17]。

因此,针对幕墙热反射问题,本文分析幕墙热反射的形成原因、变化规律及潜在危害;选择合适的幕墙建筑案例,确定其在夏季晴日昼间的热反射区位

置,通过实地热环境测试和对比,量化分析幕墙热反射对周边环境微气候与行人热舒适度的影响;从建筑单体设计和规划设计方面,提出一系列管控幕墙热反射及其危害的应对策略。希望研究能帮助建筑师、规划者和相关决策者认识幕墙热反射的危害,制定政策和标准,及时采取应对措施,合理管控其影响,确保安全并促进城市可持续发展。

1 玻璃幕墙热反射理论及危害

大面积光滑的玻璃幕墙会定向反射太阳直射光线及其辐射,地面与幕墙之间会形成热反射空间,如图 1 所示。地面上会随之形成太阳辐射强烈的热反射区,其位置和强度主要随太阳的运动而有规律地变化,如图 2 所示。除了太阳高度和位置外,热反射区的位置和大小还会受到玻璃幕墙本身的设计、材料特性、周边建筑物、地形、植被等影响。

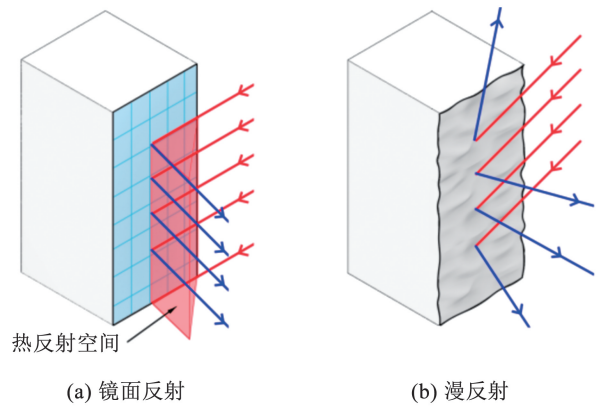


图 1 玻璃幕墙镜面反射与普通建筑立面漫反射的区别
Fig. 1 Difference between specular reflection of glass curtain walls and diffuse reflection of ordinary building facades

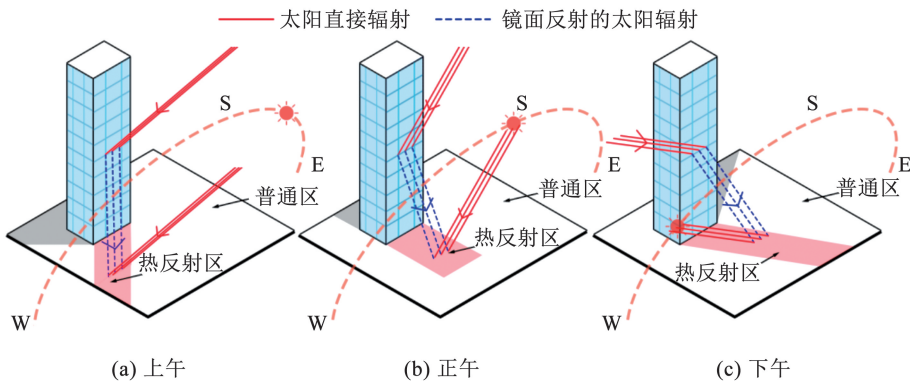


图 2 玻璃幕墙热反射对周边环境微气候的影响示意

Fig. 2 Schematic diagram of the impact of thermal reflection from glass curtain walls on the microclimate of the surrounding environment

由于热反射区地面会接收到太阳直接辐射及幕墙反射的热辐射,因而地表温度及其上空的气温会高于普通区。幕墙热反射越强烈,两区之间的热环

境差异也越大。故理论上,夏季晴日昼间的强烈太阳辐射及其因玻璃幕墙而形成的热反射会恶化热反射区的热环境,并可能带来一系列的潜在危害:

1)降低行人的热舒适感,增加行人中暑、热衰竭等热应激疾病的风险^[18];2)周边建筑物、车辆可能受到热反射的影响而受损^[9],如车辆的涂层会因长期暴露在高温环境中而加速老化,建筑物的外墙也会因高温而损害;3)影响植物生长和动物栖息^[19];4)导致邻近建筑的空调需求量增大,增加能源消耗^[19],加剧城市热岛效应。

2 玻璃幕墙热反射区位置的确定

2.1 研究背景与案例介绍

与中国其他许多城市的新开发城区一样,成都市高新区、天府新区等的街道两侧,玻璃幕墙建筑林立,或以多栋幕墙建筑群围合形成广场,具有大量合适的研究案例。但是,经过大量调查和现场踏勘,选择了成都市春熙路广场及其周边的幕墙建筑群为研究对象,因为其具有以下优势,符合研究要求。

1)广场人流聚集,对微气候的要求很高。春熙路广场地处市中心一环路(图3),交通便利,景点颇多,毗邻著名购物中心太古里、地标性建筑IFS国金中心和千年古刹大慈寺,受本地市民和外地游客的喜爱,在夏季旅游旺季人流量极大,故对广场上微气候的要求很高。

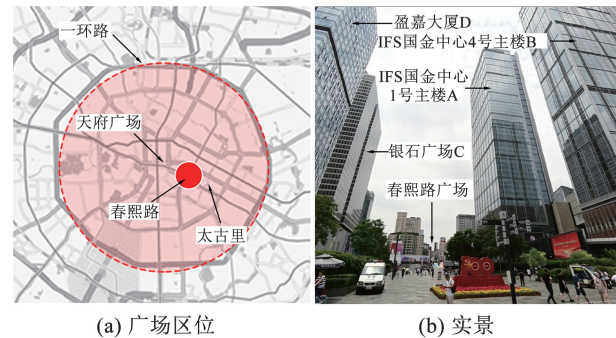


图3 春熙路广场区位及实景

Fig. 3 Location and scene of Chunxi Road Plaza

2)围绕广场东南入口处的4栋幕墙建筑体量较大。这4栋幕墙建筑均为方正的“玻璃盒子”型体量,分布密集。炎热夏季,虽然相对矮小的南侧两栋建筑C和D能够遮挡部分强烈的太阳光照射至广场上,但北侧更加高大的建筑A和B却会产生较强的热反射,影响广场内的热环境。

3)广场形式规整、尺度规模较大、硬质铺地。春熙路广场呈规整的长方形走廊式布局,形成封闭感和领域感较强的围合空间。在较大尺度的规模和统一的硬质铺装下,广场上的微气候时空差异与变化更为显著。

2.2 研究方法

鉴于肉眼难以直接辨识热反射区与普通区的光照差异,本研究采用光学模拟与模型实验相结合的方法,系统确定热反射区位置,为后续热环境实测工作提供基础。

2.2.1 光学模拟方法

GWLE(glass wall light environment)是一款基于光学镜面反射原理的专业软件,可对玻璃幕墙反射光的影响进行定性与定量分析,为幕墙物理环境评估提供科学依据,已通过国家建筑工程质量监督检验中心的权威鉴定。杨侦^[20]利用该软件模拟分析了幕墙反射光的影响范围。虽然该软件无法用于分析幕墙热反射问题,但却因太阳光热一体的特性,可用于确定幕墙反射区的位置。

根据春熙路广场及其周边幕墙建筑群的实况,先利用Rhino软件建立三维模拟模型,如图4所示。再将模型导入GWLE,并设定模拟时间为2023年8月5日,内置的成都市气象数据(表1)显示该日炎热晴朗。春熙路广场地面为石砖材质,周边建筑玻璃幕墙多采用单层钢化玻璃、夹层玻璃等,在GWLE软件中设定幕墙的厚度为25mm,吸收率为0.5,透射率为0.2,反射率为0.3,设定建筑外墙导热率为 $2.35\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,近地面粗糙度为0.7。8:00—19:00的模拟结果见图5。

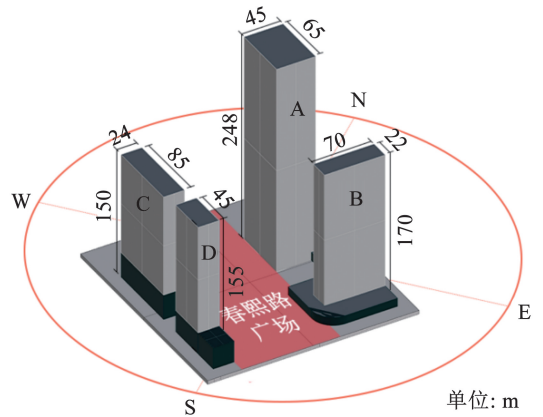


图4 春熙路广场及其周边幕墙建筑群的Rhino模型

Fig. 4 Model of curtain wall buildings in Chunxi Road Plaza in Rhino

图5中的灰度差异体现了地面光照的相对强弱关系。在图5中,按出现时间的先后顺序,对热反射区依次从1至10编号,相同幕墙产生的热反射区使用一个编号。数值约为10的大片浅灰色区为普通区,只接收了太阳直接光线;而其他颜色较深的中灰、深灰和黑色区,均可视为热反射区,幕墙反射的太阳光线提高了光照强度。11:00和16:00,广场均出现了数值接近100的黑色区,这些区域为光照最

强的热反射区,热反射现象可能较为严重。

如图 5 所示,不同时刻热反射区位置和强度随时间而变化。由于广场建筑的围合程度较高,在上

午时存在大片阴影区域可供遮荫,但在 12:00 后,随着气温上升和太阳高度角的变化,出现面积较大,热反射较强的多个热反射区。

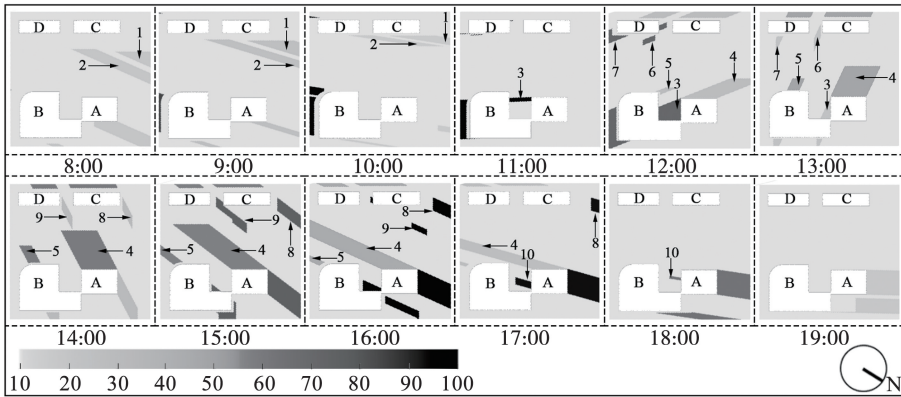


图 5 光学模拟方法确定热反射区位置

Fig. 5 Determining heat reflection zone locations using optical simulation methods

2.2.2 模型实验方法

为了确保模拟结果的准确性、可靠性,在光学模拟的基础上,进一步利用模型实验方法确定幕墙热反射区的位置。如图 6 所示,制作了春熙路广场及其周边幕墙建筑群的 1:300 缩尺实验模型,采用黑色卡纸表示广场地面,白色卡纸表示建筑幕墙,同时在其上覆盖了反射率为 0.3 的隔热膜,以模拟幕墙玻璃的反射效果;然后,将模型放置于宽敞、平坦、无遮挡的楼顶平台,于 2023 年 8 月 9 日(全日晴天,气象数据见表 1)开展实验;最后,采用广泛应用于建筑领域的 Testo890 热成像仪(如图 7 所示,热灵敏度小于 40 mK,温度为 -20 ~ 350 ℃)获得整体模型的温度分布情况。为了更清晰地显示出地面温度分布,将 4 栋幕墙建筑的热反射区色块化,得到 8:00—19:00 实验结果,如图 8 所示。



图 7 热成像仪

Fig. 7 Thermal imager

图 8 中广场地面上的颜色差异体现了地面温度的高低。与光学模拟结果相同,在 12:00 后,热反射区地面温度出现了极高值,约 65.0 ℃。由于实验模型的地面与广场地面的材质和热辐射吸收率存在差异,以及与周围建筑玻璃的反射率不同等原因,实验模型中地面的温度值并不能准确地代表广场上的实际温度。但是,由于同一时刻热反射区接受了相对更多的太阳辐射,故在广场地面温度分布图中,热反射区温度和颜色必然有别于其他区域,颜色更深的热反射区也就容易被识别和区分。

2.2.3 热反射位置综合确定

对比图 5 和图 8 可知:两种方法获取的逐时热反射区位置高度吻合,而且夏季晴日昼间地面均存在大面积的热反射区,部分时刻甚至超过了广场面积的 50%;热反射区多聚集于广场中心的人流密集区域,必然会对行人、设施等造成一定影响。因此,在后续热环境实测中,将重点测试并明确热反射区内微气候的时空分布和变化,以量化分析幕墙建筑群的热反射对春熙路广场微气候和行人热舒适度的影响。

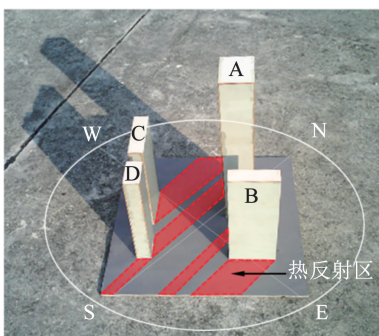


图 6 春熙路广场及其周边幕墙建筑群的实验模型

Fig. 6 Experimental model of Chunxi Road Plaza and its surrounding curtain wall building groups

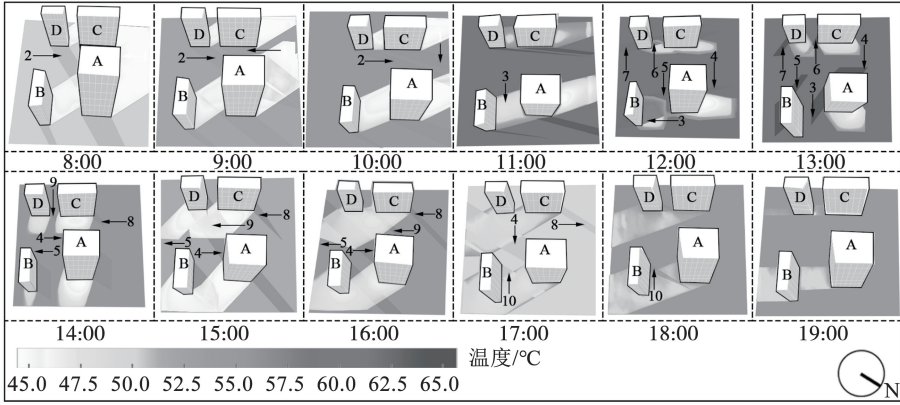


图8 缩尺模型实验确定热反射区位置

Fig. 8 Determining heat reflection zone locations through scaled model experiments

3 玻璃幕墙热反射区的微气候实测

3.1 测试与数据采集

3.1.1 测点布置

根据图5和图8中热反射区编号和位置,并结合春熙路广场的现场踏勘,在热反射区中依次标定测点R1~R10;同时,在这些测点附近各布设一个位于普通区的测点,相应编号为N1~N10,用于比较分析太阳辐射增量对热反射区内微气候的影响。

图9为测点位置分布情况。由图9可观察到各测点的分布规律及各建筑产生的热反射区范围:1)测点并不是固定不变的,而是因反射区随时间变化而变化,昼间太阳东升西落,上午时热反射区主要集中在广场西侧和北侧的较小区域,下午时其影响范围扩大,基本上覆盖整个广场;2)银石广场产生的热反射区数量最多,而IFS国金中心1号主楼产生的热反射区的影响范围最大,约占广场面积的一半。

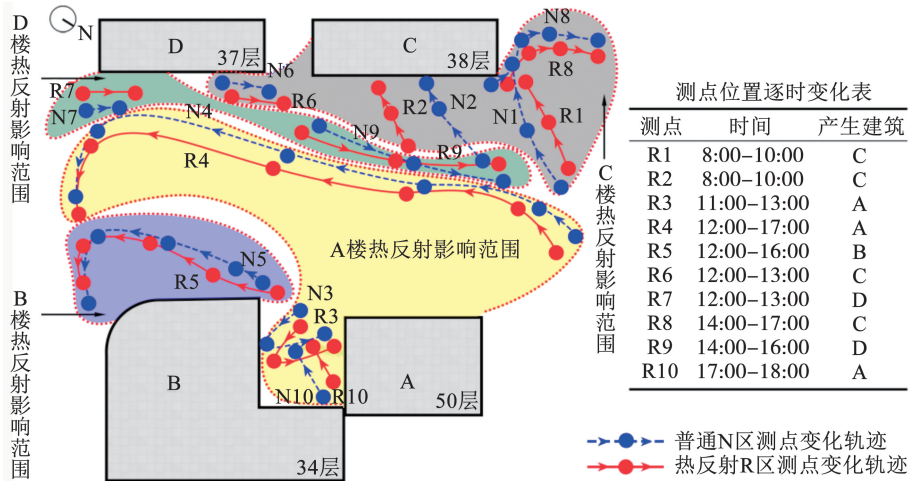


图9 测点位置分布变化

Fig. 9 Location distribution map of measurement points

3.1.2 测试时间

于2023年8月21日进行测试,当日为晴天。表1详细比较了该日与同月5日、9日的天气情况,尽管3d的气象参数有一定差别,但是5日的光学模拟、9日的模型实验只是用于确定21日现场实测的热反射区位置。这3d的日出时间均在6:30左右,日落时间均在19:50左右,说明太阳运行位置和规律的微小变化并不影响光学模拟和模型实验的结果,尤其是热反射区位置的确定。因此,按照图9布设的热反射区与普通区测点位置及相应的实测数

据,可以反映幕墙热反射区对春熙路广场微环境的影响。

表1 实验开展日逐时气象数据

Tab. 1 Daily and hourly meteorological data during the experiment

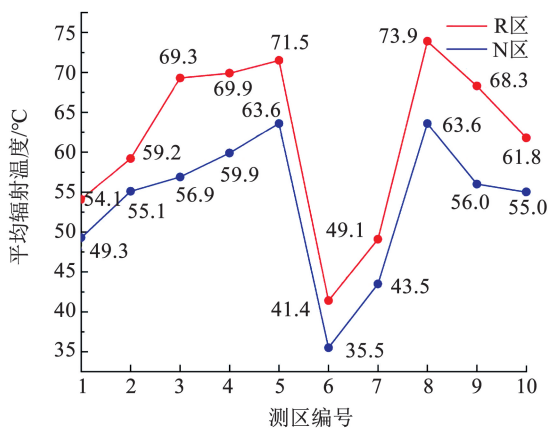
时刻	日期	太阳辐射总强度/(W·m ⁻²)	气温/°C
8:00	2023-08-05	113.7	26.0
	2023-08-09	103.9	32.1
	2023-08-21	88.5	31.4
9:00	2023-08-05	305.7	27.4
	2023-08-09	248.6	31.5
	2023-08-21	230.6	31.3

表 1(续)

时刻	日期	太阳辐射总强度/(W·m ⁻²)	气温/℃
10:00	2023-08-05	466.6	28.6
	2023-08-09	371.0	31.3
	2023-08-21	399.2	31.1
11:00	2023-08-05	616.2	29.6
	2023-08-09	451.5	30.1
	2023-08-21	522.6	30.1
12:00	2023-08-05	724.1	30.5
	2023-08-09	554.3	29.1
	2023-08-21	677.5	28.3
13:00	2023-08-05	710.2	30.9
	2023-08-09	529.4	28.1
	2023-08-21	795.1	26.7
14:00	2023-08-05	601.8	31.0
	2023-08-09	480.9	26.9
	2023-08-21	792.1	25.4
15:00	2023-08-05	763.8	31.6
	2023-08-09	543.8	26.0
	2023-08-21	759.1	25.7
16:00	2023-08-05	644.3	31.9
	2023-08-09	521.5	25.5
	2023-08-21	682.0	25.4
17:00	2023-08-05	404.7	30.3
	2023-08-09	447.6	25.3
	2023-08-21	509.0	24.6
18:00	2023-08-05	247.9	29.7
	2023-08-09	345.8	25.2
	2023-08-21	333.8	24.3
19:00	2023-08-05	153.3	29.0
	2023-08-09	132.2	25.2
	2023-08-21	144.5	24.2

3.1.3 测试设备

采用两台 Scarlet Tech 的 TWL-1S 室外热舒适仪同时测定热反射 R 区测点与相应普通 N 区测点



(a) 平均辐射温度

的主要热环境参数,即辐射(黑球)温度(量程为 -20 ~ 80 ℃,精度为 ± 0.5 ℃)、气温(量程为 -20 ~ 50 ℃,精度为 ± 0.5 ℃)、相对湿度(量程为 10% ~ 95% RH,精度为 ± 3% RH)、风速(量程为 0.4 ~ 30 m/s,精度为 ± 0.1 m/s)。测试期间各参数的传感器均距离地面 1.5 m 左右。

3.1.4 数据采集

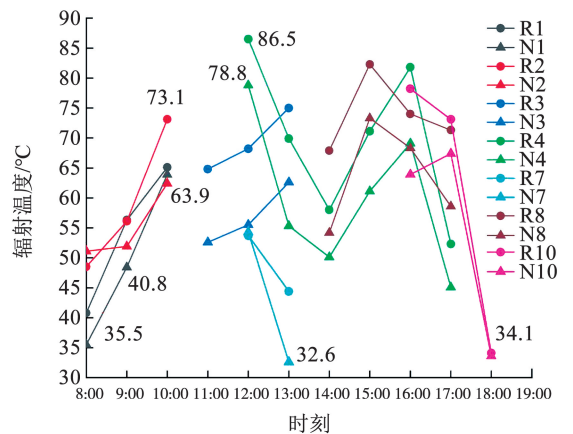
测试当日提前布置,校准设备。根据热反射区 R1 ~ R10 的出现时间,8:00—19:00 依次测试和采集热反射 R 区与对照普通 N 区各测点的热环境参数。

3.2 实测结果与分析

整理现场热环境实测结果,计算各测点的辐射温度、气温、相对湿度、风速在 8:00—19:00 的平均值。在分析逐时变化规律时,发现测点 5、6、9 的数值逐时波动范围较小,为突出热反射 R 区与普通 N 区的差异,选取数据变化显著、能明确反映区域逐时变化特征的测点 1 ~ 4、7、8、10 进行分析。

3.2.1 辐射温度

图 10 为热反射 R 区与普通 N 区的辐射温度测试结果。由图 10(a)可知:幕墙热反射增强了广场部分区域(即热反射 R 区)的热辐射强度,使得 R 区各测点 8:00—19:00 的平均辐射温度普遍高于其对应的 N 区各测点,高出 4 ~ 13 ℃;两区测点 5 和 8 的平均辐射温度均较突出,均在 60 ℃ 以上,R8 更是高达 73.9 ℃。由图 10(b)可知:各测点的辐射温度随时间变化而变化,且变化幅度较大,上午不断上升,在 12:00 达到峰值,随后在下午呈下降趋势;最高辐射温度出现在 R4 测点的 12:00 时,高达 86.5 ℃,比 N4 测点高出 7.7 ℃。



(b) 辐射温度逐时变化曲线

图 10 热反射 R 区与普通 N 区的辐射温度测试结果

Fig. 10 Measured results of radiation temperature at R and N zones

3.2.2 气温

图 11 为热反射 R 区与普通 N 区的气温测试结

果。由图 11(a)可知:幕墙热反射提高了热反射 R 区的气温,使得 R 区各测点在 8:00—19:00 的平

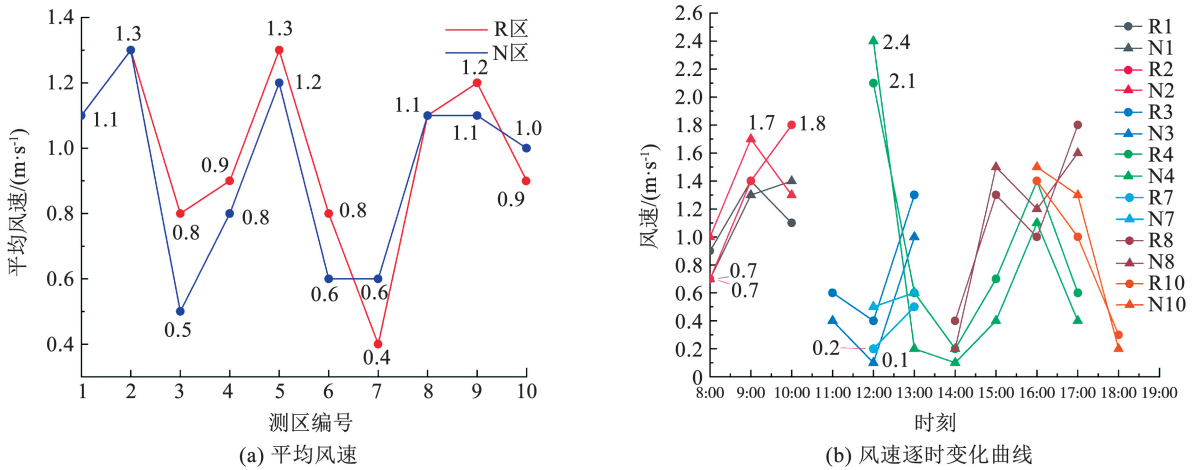


图 13 热反射 R 区与普通 N 区的风速测试结果

Fig. 13 Measured results of wind speed at R and N zones

3.3 对广场行人热舒适度的影响

热环境参数显著影响着人体的热舒适度^[21],故将进一步分析幕墙热反射对春熙路广场上行人热舒适度的影响。热气候指数 (universal thermal climate index, I_{UTC}) 是当前考虑因素最全面、最具普适性、更关注模型客观性的人体舒适度指标^[22],可以反映室外热环境的特征。 I_{UTC} 的计算涉及人体热传递、环境热交换、热条件反应等^[23],计算式为

$$I_{UTC} = T_a + O_{set}(T_a, T_{mrt}, V_a, P_{vapour}) \quad (1)$$

式中: T_a 为空气温度,℃; T_{mrt} 为平均辐射温度,℃; V_a 为风速,m/s; P_{vapour} 为水汽压力,hPa; $O_{set}(\cdot)$ 为偏移量函数。

依据式(1)计算出各热反射 R 区和普通 N 区的 I_{UTC} 平均值,如图 14 所示。

由图 14(a)可知:幕墙热反射提高了热反射 R 区

的 I_{UTC} 值,R 区各测点的平均 I_{UTC} 普遍比其对应的 N 区各测点高出 2 ~ 5 ℃;因幕墙热反射的影响,部分热反射区的 I_{UTC} 甚至跨越了一个热舒适区间;广场上各测点的平均 I_{UTC} 大致为 30 ~ 50 ℃,普遍高于人体热舒适区。

由图 14(b)可知:各测点 I_{UTC} 值的逐时变化呈先增后降的趋势;夏季昼间只有在太阳高度较低的清晨和日落后,在不受幕墙热反射影响的建筑、植被等形成的阴影区域内, I_{UTC} 值才可能处于较热不舒适 ($26\text{ }^\circ\text{C} \leq I_{UTC} < 32\text{ }^\circ\text{C}$) 的等级,其他时间多处于热不舒适 ($32\text{ }^\circ\text{C} \leq I_{UTC} < 38\text{ }^\circ\text{C}$)、很热不舒适 ($38\text{ }^\circ\text{C} \leq I_{UTC} < 46\text{ }^\circ\text{C}$) 等级,甚至极热不舒适 ($I_{UTC} \geq 46\text{ }^\circ\text{C}$) 等级^[23],如 R4、R8 和 R10 的 I_{UTC} 超过了 45 ℃;两个测区的 I_{UTC} 均显示出类似与气温、平均辐射温度的变化规律。

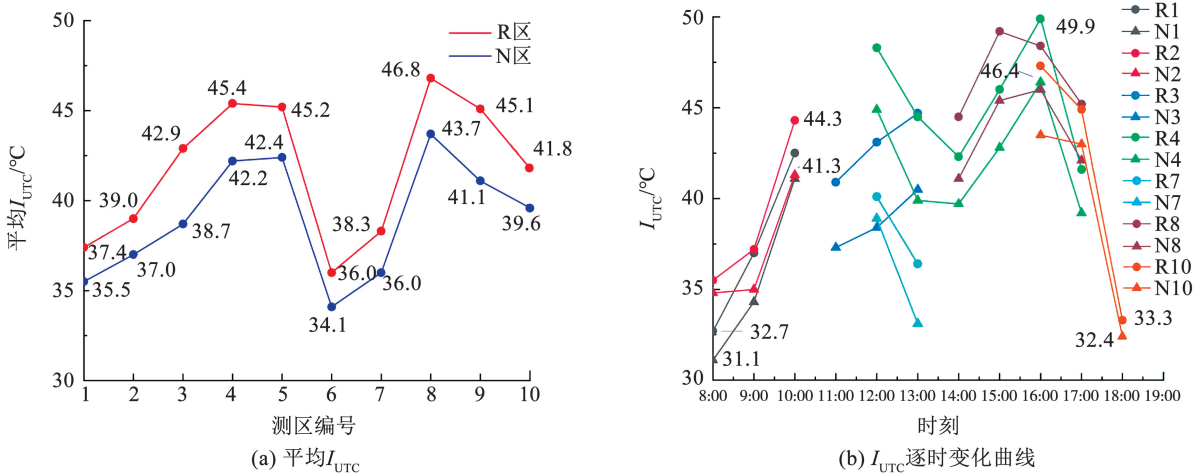


图 14 热反射 R 区与普通 N 区的 I_{UTC} 结果

Fig. 14 Calculation results of I_{UTC} at R and N zones

上述结果进一步证明了幕墙热反射对周边环境微气候、对人体热舒适度的影响。由于成都市处于

中国太阳辐射总量一般带^[24],太阳辐射强度相对较弱,故本案例中幕墙热反射的影响并不显著。若该

案例位于太阳辐射强度较大地区,则幕墙热反射的影响必然更加显著。

4 玻璃幕墙热反射的应对策略

4.1 建筑单体设计方面的应对策略

1) 优化幕墙的角度和布局,如打造基于折纸的自适应立面^[25],动态地调整幕墙的形状和方向,以适应不断变化的日照条件,可显著减少城市环境中幕墙建筑的反射辐射;2) 调整幕墙材质,优先考虑具有低反射率的玻璃^[26],如无色浮法玻璃、吸热玻璃等,以降低热反射,或者在幕墙表面增加磨砂处理或采用特殊涂层,以降低玻璃的反射率,如台北 101 大楼采用了低反射的 Low-E 玻璃,将可见光反射率控制在 0.25 以下,故在满足室内热舒适度时,其幕墙反射的太阳辐射不会严重影响建筑周边环境^[4];3) 减少玻璃幕墙面积,降低玻璃表面反射的太阳辐射,同时也可降低太阳辐射的透射量,达到降低室温、节约能源的目的;4) 增加遮阳设施,如达拉斯博物馆加装百叶窗遮阳板,在保持建筑原有的艺术形态的基础上,尽量阻挡来自周边幕墙建筑所反射的强烈太阳辐射^[3]。

4.2 规划设计方面的应对策略

1) 降低幕墙建筑群围合空间的宽高比,增大阴影区面积,从而降低场地内的气温和平均辐射温度;2) 适当采用高围合度的空间形式,有效减少直射阳光照射,降低建筑周边环境的气温和平均辐射温度;3) 合理设计幕墙建筑群围合的开口方向,使凉爽的自然风可顺畅地穿过,带走滞留的热空气;4) 人群活动场地可布置在幕墙建筑的北面,这样夏季南侧的建筑可在的活动场地内形成阴影,起到建筑遮荫效果;5) 合理布置植物,优先选择具有高大树冠的落叶植物品种,以遮挡夏季阳光、吸收部分太阳辐射、减少热反射区面积并降低其辐射温度,还能通过蒸腾作用释放水蒸气来降低气温;6) 在热反射区内合理设置水体、喷泉等,提高硬质铺装广场或街区的湿度;7) 设置遮阳结构,如棚架、遮阳伞、帆布等构件,减少地面接收直接太阳辐射和幕墙反射的太阳辐射。

4.3 春熙路广场玻璃幕墙热反射的应对策略

作为成都市的著名旅游景点,春熙路广场受到周边幕墙建筑群热反射的影响,形成了不舒适的高温高热低湿环境,在夏季旅游高峰期会极大减少游客在此游憩、观光、购物的意愿和时间,甚至会影响成都的整体形象。因此,鉴于广场现状,可采取以下措施,降低幕墙热反射的不利影响:1) 玻璃幕墙上加设遮阳构件;2) 合理布置植被替代广场上部分硬

质铺装;3) 在广场部分区域,特别是夏季期间正午时分的幕墙热反射区,增加伞形遮阳架、林荫道等;4) 在广场东南入口处、广场中间地带等,增设水体、喷泉、人造景观喷雾等。改善措施示意如图 15 所示。

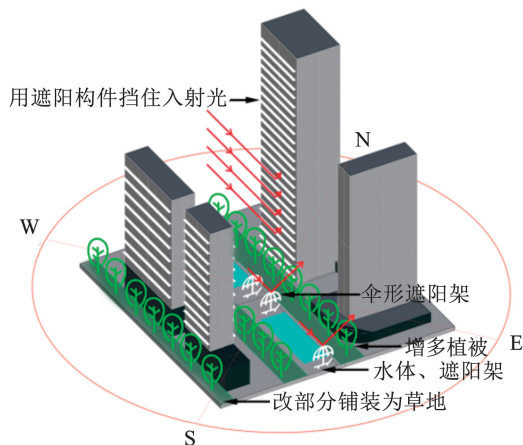


图 15 春熙路广场的改善措施示意

Fig. 15 Improvement measures for Chunxi Road Plaza

5 结论

通过理论分析、光学模拟、模型实验和现场热环境测试等方法,研究了夏季玻璃幕墙热反射对周边环境微气候的影响,得到以下结论:

1) 在夏季晴日昼间,幕墙热反射会恶化其周边环境的微气候。玻璃幕墙建筑的大面积光滑表皮能够镜面反射太阳直射光线和热量。由于幕墙反射的太阳辐射增加,地面上的热反射区域的微气候将与普通区域有所不同,表现为高辐射、高温和低湿度。

2) 由于太阳有规律地运行,同一玻璃幕墙建筑形成的热反射区位置及其对周边环境微气候的影响程度会随时间而有规律地变化。

3) 以夏季晴日昼间成都市春熙路广场及其周边玻璃幕墙建筑群为例的研究,证明了幕墙热反射对周边环境微气候的影响及其规律。相对于普通区,热反射区的平均辐射温度高出 4 ~ 13 °C,气温高出 1 ~ 2 °C,湿度低了 5% ~ 10%,热气候指数 I_{UTC} 高出 2 ~ 5 °C。

4) 从建筑单体设计和规划设计方面,可采用例如加设遮阳构件、增设水体等应对策略,管控幕墙热反射及其危害。

参考文献

- [1] 张明宇. 我国城市光污染研究回顾[J]. 照明工程学报, 2019, 30(5): 27
ZHANG Mingyu. Review of researches on urban light pollution in China[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2019, 30(5): 27. DOI: 10.3969/j. issn. 1004 - 440X. 2019. 05. 006
- [2] WEN Jianxiu, IGNATIUS M, CHEN E X, et al. Impacts of a highly

- reflective stainless-steel facade on a surrounding building: a case study in Singapore[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 90: 104377. DOI: 10.1016/j.scs.2022.104377
- [3] RORY S. Search ends for solution to museum tower's glare problems at Nasher Sculpture Center[EB/OL]. (2015-09-03) [2024-06-17] <https://www.archdaily.com/773066/search-ends-for-solution-to-museum-towers-glare-problems-at-nasher-sculpture-center>
- [4] WONG J S J. A comprehensive ray tracing study on the impact of solar reflections from glass curtain walls [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(1): 16. DOI: 10.1007/s10661-015-4897-4
- [5] ZHU Jiajie, JAHN W, REIN G. Computer simulation of sunlight concentration due to façade shape: application to the 2013 Death Ray at Fenchurch Street, London[J]. *Journal of Building Performance Simulation*, 2019, 12(4): 378. DOI: 10.1080/19401493.2018.1538389
- [6] DANKS R, GOOD J, SINCLAIR R. Assessing reflected sunlight from building facades: a literature review and proposed criteria[J]. *Building and Environment*, 2016, 103: 193. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.04.017
- [7] 欧英雷. 玻璃幕墙的几何形状对反射太阳光引起的视觉掩盖效应的量化研究[J]. *四川建筑科学研究*, 2016, 42(2): 121
OU Yinglei. Quantitative analysis of glass curtain wall reflection of sunlight caused the visual masking[J]. *Sichuan Building Science*, 2016, 42(2): 121. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1933.2016.02.027
- [8] FOTIOS S, KENT M. Measuring discomfort from glare: recommendations for good practice[J]. *Leukos*, 2021, 17(4): 338. DOI: 10.1080/15502724.2020.1803082
- [9] BBC. "Walkie-Talkie" skyscraper melts Jaguar car parts[EB/OL]. (2013-09-02) [2024-06-13]. <https://www.bbc.com/news/uk-england-london-23930675>
- [10] 应申, 唐茉, 张馨月, 等. 三维城市的玻璃幕墙光污染分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(5): 610
YING Shen, TANG Mo, ZHANG Xinyue, et al. Sunlight pollution analysis of glass curtain wall in 3D city [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(5): 610. DOI: 10.13203/j.whugis20200492
- [11] KIM S K, RYU J H, SEO H C, et al. Understanding occupants' thermal sensitivity according to solar radiation in an office building with glass curtain wall structure[J]. *Buildings*, 2022, 12(1): 58. DOI: 10.3390/buildings12010058
- [12] 田一辛, 黄琼, 王韬. 窗面积影响室内热舒适的实测与模拟对比研究[J]. *建筑科学*, 2022, 38(10): 84
TIAN Yixin, HUANG Qiong, WANG Tao. Comparative field and simulation study on the effects of window area on indoor thermal comfort [J]. *Building Science*, 2022, 38(10): 84. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2022.10.11
- [13] 高甫生, 周雪飞. 玻璃幕墙建筑夏季室内热环境研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2004, 36(2): 250
GAO Fusheng, ZHOU Xuefei. Indoor thermal environment of glass-wall buildings in summer [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2004, 36(2): 250
- [14] 杜峰, 孟庆林. 玻璃幕墙建筑的室内光污染和热环境研究[J]. *建筑科学*, 2011, 27(2): 61
DU Feng, MENG Qinglin. Research on indoor light pollution and thermal environment in the building equipped with glass curtain wall [J]. *Building Science*, 2011, 27(2): 61. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2011.02.016
- [15] BATTISTA G, VOLLARO E D, OČLOŤ P, et al. Effect of mutual radiative exchange between the surfaces of a street canyon on the building thermal energy demand[J]. *Energy*, 2021, 226: 120346. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120346
- [16] WANG Pengcheng, LIU Zhongbing, ZHANG Ling. Sustainability of compact cities: a review of inter-building effect on building energy and solar energy use [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 72: 103035. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103035
- [17] WEN J, IGNATIUS M, WONG N H. A prediction model for fast evaluation of reflective glare from surrounding buildings[J]. *Solar Energy*, 2022, 243: 279. DOI: 10.1016/j.solener.2022.07.041
- [18] 张俊清. 建筑构造技术的玻璃幕墙节能策略分析[J]. *建筑工程与管理*, 2024, 6(6): 41
ZHANG Junqing. Analysis of energy-saving strategies for glass curtain walls in architectural construction technology [J]. *Architecture Engineering and Management*, 2024, 6(6): 41. DOI: 10.33142/aem.v6i6.12066
- [19] 高正文, 卢云涛, 陈远翔. 城市光污染及其防治对策[J]. *环境保护*, 2019, 47(13): 44
GAO Zhengwen, LU Yuntao, CHEN Yuanxiang. Study on urban light pollution and its countermeasures [J]. *Environmental Protection*, 2019, 47(13): 44. DOI: 10.14026/j.cnki.0253-9705.2019.13.009
- [20] 杨侦. 玻璃幕墙建筑反射眩光防控设计策略研究[D]. 天津: 天津大学, 2016
YANG Zhen. The research on design strategy for preventing and controlling reflecting lights coming from glass curtain wall buildings [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016
- [21] 刘琳, 刘京, 肖荣波, 等. 控规阶段的城区热环境评估分析软件[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(2): 92
LIU Lin, LIU Jing, XIAO Rongbo, et al. Evaluation software for the urban regional thermal environmental analysis for regulatory planning [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(2): 92. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2017.02.015
- [22] BRÖDE P, KAMPMANN B. Temperature-humidity-dependent wind effects on physiological heat strain of moderately exercising individuals reproduced by the universal thermal climate index (UTCI) [J]. *Biology*, 2023, 12(6): 802. DOI: 10.3390/biology12060802
- [23] FIALA D, HAVENITH G, BRÖDE P, et al. UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56(3): 429. DOI: 10.1007/s00484-011-0424-7
- [24] 国家能源局. 我国太阳能资源是如何分布的? [EB/OL]. (2014-08-03) [2024-06-10]. https://www.nea.gov.cn/2014-08/03/c_133617073.htm
- [25] MELONI M, ZHANG Qian, CAI Jianguo, et al. Origami-based adaptive facade for reducing reflected solar radiation in outdoor urban environments [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 97: 104740. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104740
- [26] YUAN Jihui, FARNHAM C, EMURA K. Effect of different reflection directional characteristics of building facades on outdoor thermal environment and indoor heat loads by CFD analysis [J]. *Urban Climate*, 2021, 38: 100875. DOI: 10.1016/j.uclim.2021.100875